

на правах рукописи

**ЗИНИН Денис Петрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ  
СТРУКТУРЫ ТРОПОСФЕРЫ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы  
01.04.03 – радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань - 2009

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский Государственный Университет им В.И. Ульянова-Ленина»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор КГУ  
ТЕПТИН Герман Михайлович,  
г. Казань;

доктор физико-математических наук,  
доцент КГУ  
ХУТОРОВА Ольга Германовна,  
г. Казань.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор КГЭУ  
МОСКАЛЕНКО Николай Иванович,  
г. Казань;

доктор физико-математических наук,  
зав. отд. ФГНУ НИРФИ  
ТРОИЦКИЙ Аркадий Всеволодович,  
г. Н.-Новгород.

Ведущая организация: Государственное учреждение  
«Центральная Аэрологическая Обсерватория»  
Росгидромета (ГУ ЦАО),  
г. Долгопрудный.

Защита диссертации состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_2009 г. в «\_\_\_» часов «\_\_\_» минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском Государственном Университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, аудитория \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы и ее влиянию на распространение радиоволн. Под мезомасштабами в данной работе подразумеваются характерные временные интервалы от десятков минут до десятков часов, пространственные интервалы от километров до сотен километров.

Разработана модель мезомасштабной неоднородной структуры реальной атмосферы на основе методов трехмерного численного моделирования динамики атмосферы, с использованием эмпирических данных, реальных геофизических данных, с учетом нестационарного характера атмосферных процессов.

Получены параметры мезомасштабных пространственно-временных вариаций метеопараметров, концентрации ряда примесей, коэффициента преломления радиоволн. Исследовано влияние мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы на физические характеристики радиотрасс при различных зенитных углах с учетом зависимости от времени суток и сезона.

**Актуальность темы.** В реальной атмосфере присутствуют неоднородности и возмущения в широком спектре масштабов. В настоящее время мезомасштабная пространственно-временная неоднородная структура атмосферы остается изученной недостаточно. Изучение мезомасштабной неоднородной структуры атмосферных параметров необходимо для решения фундаментальных и прикладных задач экологии, распространения радиоволн в атмосфере, физики атмосферных процессов, и является одним из актуальных направлений современных исследований в области физики атмосферы и радиофизики.

Для задач спутникового радиозондирования земной поверхности и навигации представляет интерес всестороннее исследование возмущения, которое оказывает мезомасштабная неоднородная структура реальной атмосферы на распространение радиоволн по различным трассам. Для получения точных параметров указанного возмущения необходимо восстановление реальной мезомасштабной неоднородной структуры коэффициента преломления по всей длине радиотрассы на момент распространения радиоволн. Мезомасштабная неоднородная структура реальной атмосферы, в том числе поля коэффициента преломления, меняется во времени, зависит от реальных гео- и метеоусловий на местности.

Для всестороннего изучения указанных явлений и процессов необходимы трехмерные данные о полях атмосферных параметров в реальной атмосфере и их динамика. Получение подобных данных в достаточном разрешении экспериментальными методами сопряжено с рядом практических трудностей, высоких материальных затрат, иногда вовсе технически неосуществимо. Рост вычислительной мощности современных распределенных вычислительных систем и указанные выше проблемы делают актуальным направление исследований мезомасштабных атмосферных процессов на основе сочетания экспериментальных методов и методов численного моделирования, что снимает часть ограничений чистых экспериментальных методик.

**Целью работы** является исследование мезомасштабных пространственно-временных вариаций полей различных атмосферных параметров (метеопараметры, примеси, коэффициент преломления радиоволн), а также влияния мезомасштабной структуры коэффициента преломления на распространение радиоволн в атмосфере.

**Решаемые задачи.** Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- Разработка адекватной трехмерной модели мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы (метеопараметров, ряда примесей, коэффициента преломления) и ее динамики.
- Получение достоверных мезомасштабных неоднородных полей атмосферных параметров и их динамики.
- Исследование пространственно-временной изменчивости мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы.
- Исследование влияния мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы на физические характеристики радиотрасс.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач базируется на комплексном подходе, использующем мезомасштабную численную метеомодель, реальные метео- и геофизические данные, длинные ряды натурных измерений, модель коэффициента преломления радиоволн, модель распространения радиоволн в неоднородной среде. Применяется метод параллельных расчетов на высокопроизводительном вычислительном кластере. Анализ мезомасштабных пространственно-временных вариаций атмосферных параметров и их влияния на распространение радиоволн проводится с использованием статистических методов.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

- Впервые разработана модель мезомасштабной пространственно-временной изменчивости атмосферных параметров, включающая концентрацию ряда примесей и коэффициент преломления радиоволн, на основе численной метеомодели и длинных рядов ежеминутных натурных измерений.
- Впервые получена приближенная к реальной детальная мезомасштабная трехмерная динамика неоднородной структуры метеопараметров, концентрации ряда примесей (аэрозоль,  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), коэффициента преломления радиоволн в атмосфере над территорией РТ (Республика Татарстан).
- Впервые получены параметры мезомасштабной пространственно-временной изменчивости полей метеопараметров, концентрации примесей, коэффициента преломления в атмосфере над территорией РТ на основе трехмерных полей и их динамики.

- Впервые получены значения возмущения физических характеристик радиотрасс мезомасштабной неоднородной структурой атмосферы с учетом зависимости от времени суток и сезонов года, на основе трехмерных полей коэффициента преломления и их динамики.

#### **На защиту выносятся:**

- Нестационарная модель мезомасштабной неоднородной структуры метеопараметров, примесей (аэрозоль,  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), коэффициента преломления радиоволн в тропосфере над территорией РТ.
- Закономерности пространственно-временной изменчивости мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы для метеопараметров, примесей (аэрозоль,  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), полученные по длинным рядам трехмерных полей высокого разрешения над территорией РТ.
- Мезомасштабная неоднородная структура коэффициента преломления радиоволн в атмосфере и параметры возмущения физических характеристик радиотрасс с учетом зависимости от времени суток и сезонов года.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена базой уникальных данных ежеминутного мониторинга метеопараметров и примесей на сети пространственно разнесенных станций в восточно-европейской области России (г. Азнакаево - станция с координатами  $54.85^\circ$  с.ш.,  $53.1^\circ$  в.д.; г. Альметьевск - сеть из 5 станций, разнесенных на расстояния от 1 до 6 км, с координатами центра  $54.9^\circ$  с.ш.,  $52.3^\circ$  в.д.; г. Зеленодольск - станция с координатами  $55.85^\circ$  с.ш.,  $48.5^\circ$  в.д.; г. Казань - станция с координатами  $55.8^\circ$  с.ш.,  $49.1^\circ$  в.д.; г. Миннибаево - 2 станции, разнесенные на расстояние 2.5 км по долготе, с координатами центра  $54.8^\circ$  с.ш.,  $52.2^\circ$  в.д.) с 1996 года по 2005 год включительно.

**Практическая ценность работы.** Модель мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы над территорией РТ, включающая метеопараметры, концентрации ряда примесей, коэффициент преломления, применима для научных исследований и решения широкого круга задач в области физики атмосферы, радиофизики, экологии. Модель применима для исследований атмосферы над другими территориями с некоторыми переработками под локальные особенности местности. Использование модели позволяет сократить расходы на получение экспериментальных данных, позволяет получить данные недоступные экспериментальными методами.

Массив данных о динамике реальной атмосферы над территорией РТ и пространственно-временные характеристики мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы отражают особенности атмосферной физики, могут быть использованы при разработке соответствующих теоретических концепций, применимы для научных исследований и решения широкого круга задач в области физики атмосферы, радиофизики, экологии.

Результаты и закономерности по влиянию мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы на характеристики радиотрасс отражают особенности атмосферной физики, ценны для понимания сущности атмосферной радиофизики, применимы для практического совершенствования методов спутникового дистанционного зондирования земной поверхности, повышения точности современных средств навигации, радиолокации и др., позволяют сократить расходы измерения радиоволновых характеристик атмосферы.

**Степень внедрения.** Разработанная модель и другие результаты данной работы применяются в различных научных исследованиях в области физики атмосферы и радиофизики в Казанском Государственном Университете, в частности для исследований с использованием просвечивания атмосферы радиоволнами на трассах ”приемник – спутник (GPS-Глонасс)”.

**Личный вклад автора.** Автором выполнены работы по решению поставленных задач аналитическими и численными методами. Проведены работы по созданию вычислительного кластера. Разработана распределенная численная модель мезомасштабной неоднородной структуры реальной атмосферы над территорией РТ, включающей поля концентрации примесей и коэффициента преломления. Проведено моделирование и получены трехмерные поля мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы и ее динамика. Проведен анализ пространственно-временных вариаций мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы. Проведено численное моделирование распространения радиоволн в полученной неоднородной среде и анализ полученных результатов. Сделаны основные выводы по полученным результатам.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI Рабочая группа “Аэрозоли Сибири”, Томск, Ноябрь 2004; XXI Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, Йошкар-Ола, Май 2005; 3-я международная конференция “Фундаментальные проблемы физики”, Казань, Июнь 2005; European Aerosol Conference 2005 (EAC 2005), Ghent, August 2005; Международная конференция “Аэрозоли и Безопасность – 2005”, Обнинск, Октябрь 2005; XII Рабочая группа “Аэрозоли Сибири”, Томск, Ноябрь 2005; XXIV Всероссийский симпозиум “Радиолокационное исследование природных сред”, Санкт-Петербург, Апрель 2006; Российско-Канадский семинар “Моделирование атмосферного переноса загрязнений при террористических актах, взрывах и пожарах промышленных предприятий”, Москва, Июнь 2006; Advanced atmospheric aerosol symposium, Milan, November 2006; XIII Рабочая группа “Аэрозоли Сибири”, Томск, Ноябрь 2006; Региональная научно-практическая конференция “Картография. Навигация. Геоинформационные системы”, Казань, Июнь 2007; European Aerosol Conference 2007 (EAC 2007), Salzburg, September 2007; XIV Рабочая группа “Аэрозоли Сибири”, Томск, Ноябрь 2007; Региональная научно-практическая конференция “Геоинформационные системы. Тенденции, проблемы, решения”, Казань, Июнь 2008; III Межрегиональная конференция “Промышленная экология и безопасность”, Казань, Сентябрь 2008; XXII Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, Сочи, Сентябрь 2008.

Автор принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях, поддержанных грантами: РФФИ 04-05-64194, РФФИ 03-05-96211, НИОКР 09-9.5-187, госконтрактами Академии наук РТ №№ 06-6.3-13 и 09-9.5-32, “Университеты России” УР 01.01.074. Автор принимал участие в качестве научного руководителя в исследовании, поддержанном грантом молодых ученых Академии наук РТ 07-2/2008.

**Работа удостоена наград:** 1 место в секции радиофизика на итоговой студенческой научно-практической конференции КГУ, Казань, Май 2004; Грамота молодых ученых на XII рабочей группе "Аэрозоли Сибири", Томск, Ноябрь 2005; Победитель конкурса на соискание именных стипендий Мэра города Казани, Казань, 2006; Грамота молодых ученых (1-е место) на XIV рабочей группе "Аэрозоли Сибири", Томск, Ноябрь 2007.

**Публикации.** Автором опубликовано по теме диссертации 32 работы. Из них 11 статей в научных журналах (из них 4 по списку ВАК), 4 статьи в сборниках трудов научных конференций, 17 опубликованных тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 159 страницы печатного текста, в том числе 65 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 151 источник.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, изложена структура работы.

**В первой главе** представлен обзор современных представлений о физике атмосферы, мезомасштабных атмосферных процессах и их динамике. Приведен обзор работ и текущего положения дел в отношении актуальных направлений и методов исследований мезомасштабных атмосферных процессов, мезомасштабных пространственно-временных вариаций атмосферных параметров, их значимости в радиофизических задачах.

Показано, что реальная атмосфера является комплексным объектом, сочетающим сложный состав и широкое разнообразие протекающих физических процессов. Их непрерывная совместная динамика описывается нелинейными дифференциальными уравнениями и вместе с неоднородным нестационарным характером граничных условий формирует существенно неоднородную нестационарную пространственно-временную структуру атмосферных параметров в широком спектре масштабов, в частности на мезомасштабах. Наличие существенной пространственно-временной неоднородной структуры распространяется на поля концентраций атмосферных примесей и коэффициента преломления радиоволн.

Показано, что мезомасштабная неоднородная структура атмосферы остается недостаточно хорошо изученной в силу трудностей учета всех значимых факторов, теоретического расчета, проблематичности и стоимости экспериментальных измерений. Обоснована актуальность изучения мезомасштабной неод-

нородной структуры атмосферы с учетом нелинейности уравнений гидротермодинамики, учетом обширного комплекса атмосферных процессов. Обоснована необходимость в методике, позволяющей получать достоверные трехмерные поля атмосферных параметров и их динамику.

Показано, что проблемы влияния мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы на характеристики радиотрасс остаются недостаточно изученными и их исследование является актуальным направлением в связи с бурным внедрением спутниковых технологий и систем связи-навигации класса земля-спутник.

В главе приведен обзор современных методов исследования атмосферы, включающих разнообразные экспериментальные методики, а также методики лабораторных и численных моделирований. Показано, что сочетание методов численного моделирования и использования экспериментальных данных позволяет решить поставленные выше задачи по исследованию мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы и ее влиянию на распространение радиоволн.

**Во второй главе** представлено описание базовых физических, математических, вычислительных методов и исходных данных, на основании которых создается модель мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы и проводятся исследования в следующих главах.

Представлено описание используемой в работе уникальной базы метеоданных длительных (1996-2005 г.) ежеминутных натурных измерений и характеристики аппаратуры, на которой они получены. Представлено описание и характеристики данных реанализа о состоянии и динамике тропосферы и нижней стратосферы за 1996-2005 г. Представлен обзор используемой в работе численной мезомасштабной нестационарной метеомодели WRF, с описанием основных исходных уравнений гидротермодинамики. Приведено представление коэффициента преломления радиоволн в атмосфере через основные атмосферные параметры (приближение Дебая):

$$n = \left( \frac{155.2 \cdot 10^{-6} p}{T} + \frac{7.45 \cdot 10^{-1} l}{T^2} + 1 \right)^{1/2},$$

где  $T$  – абсолютная температура воздуха (К),  $p$  – парциальное давление сухого воздуха (мбар),  $l$  – парциальное давление паров воды (мбар). Описана методика численного моделирования распространения радиоволн в неоднородной среде. Описана методика распределенных расчетов на высокопроизводительном вычислительном кластере, необходимая для проведения данного исследования.

На основании представленных методов и исходных данных реанализа с применением карт рельефа и землепользования, задающих реальные физические характеристики подстилающей поверхности, разработана мезомасштабная нестационарная модель реальной атмосферы над территорией РТ. Модель учитывает комплексную природу атмосферных явлений и включает параметризацию отдельных атмосферных процессов: конвективные движения, процессы приземного слоя, взаимодействие с неоднородной подстилающей поверхно-



стью, взаимодействие с солнечным и земным (прямым и отраженным) излучением. Модель позволяет получить достоверную мезомасштабную неоднородную структуру атмосферных параметров и их динамику, на основании которых проводится исследование в последующих главах.

Сравнением с данными натурных измерений на сети приземных станций атмосферного мониторинга показана достоверность результатов моделирования, что позволяет говорить о достаточной степени адекватности разработанной модели.

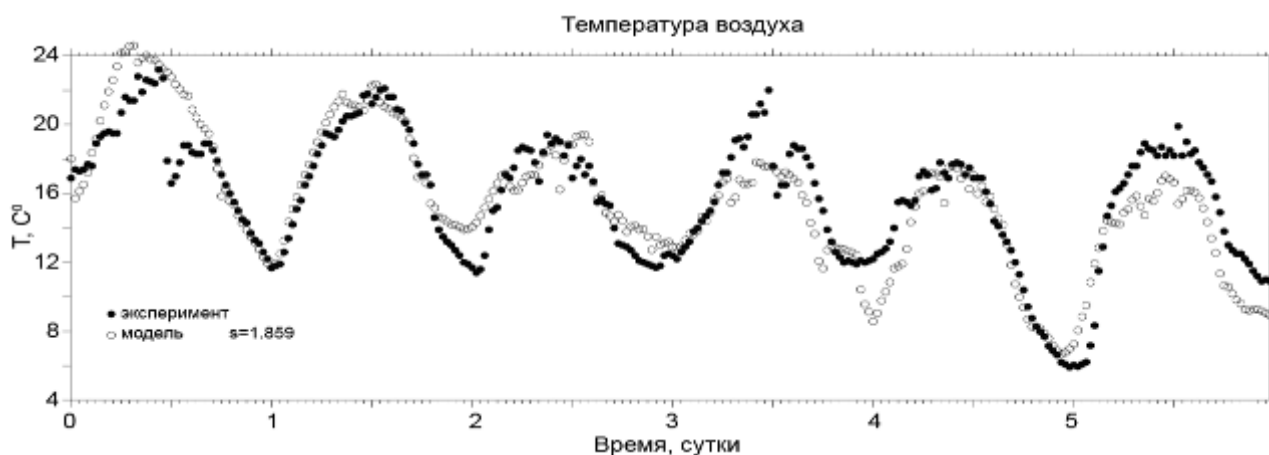


Рис. 1. Температура воздуха на станции Азнакаево: модель и эксперимент. Отсчет времени от 1 июля 2005 г. 00:00 UTC (UTC – универсальное координированное время, в пределах допустимой в модели и эксперименте погрешности совпадает со средним гринвичским временем).  $s$  - среднеквадратичное отклонение рядов.

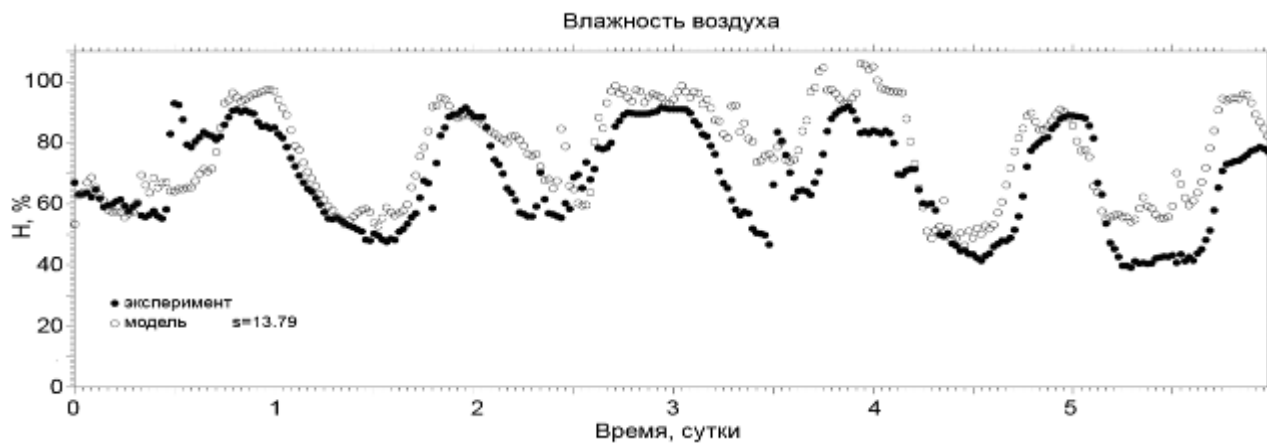


Рис. 2. Влажность воздуха на станции Азнакаево: модель и эксперимент. Отсчет времени от 1 июля 2005 г. 00:00 UTC.  $s$  - среднеквадратичное отклонение рядов.

**В третьей главе** изложены основные результаты по исследованию мезомасштабной неоднородной структуры метеопараметров и примесей в атмосфере.

Получены мезомасштабная неоднородная структура метеопараметров, ряда фоновых компонент примесей (аэрозоль,  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) в атмосфере над территорией РТ и их динамика за несколько периодов, покрывающих сезонный ход 2005 г. (для метеопараметров получена также динамика за весь 1998 г.) Получена динамика распространения загрязнений при антропогенных выбросах аэрозоля и  $\text{SO}_2$ .

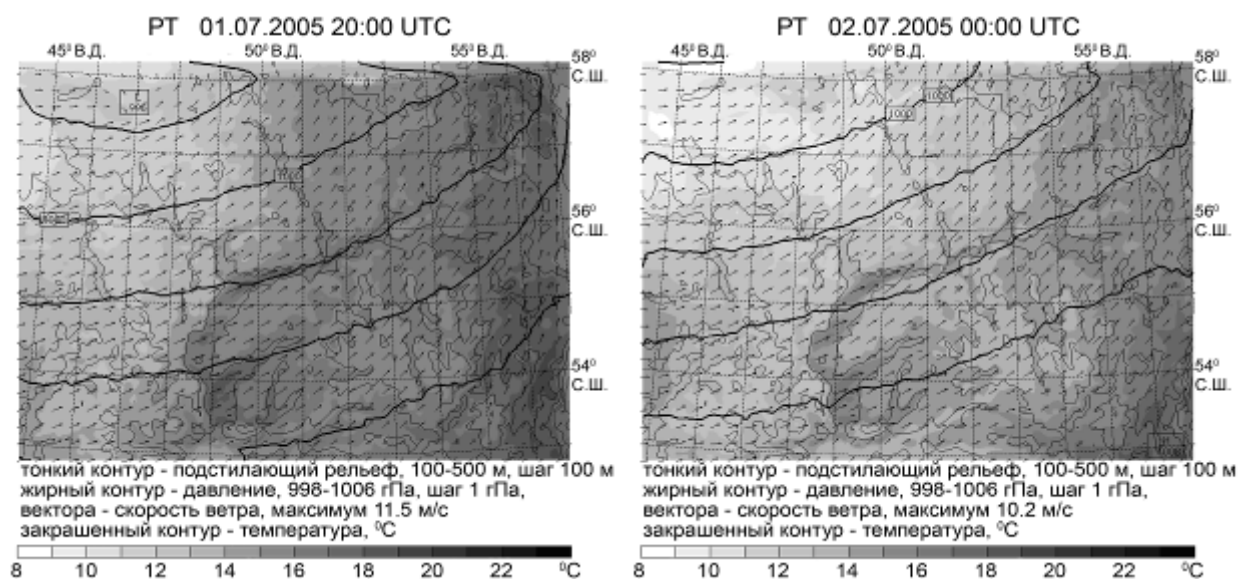


Рис. 3. Температура воздуха на высоте 30 м над поверхностью земли.

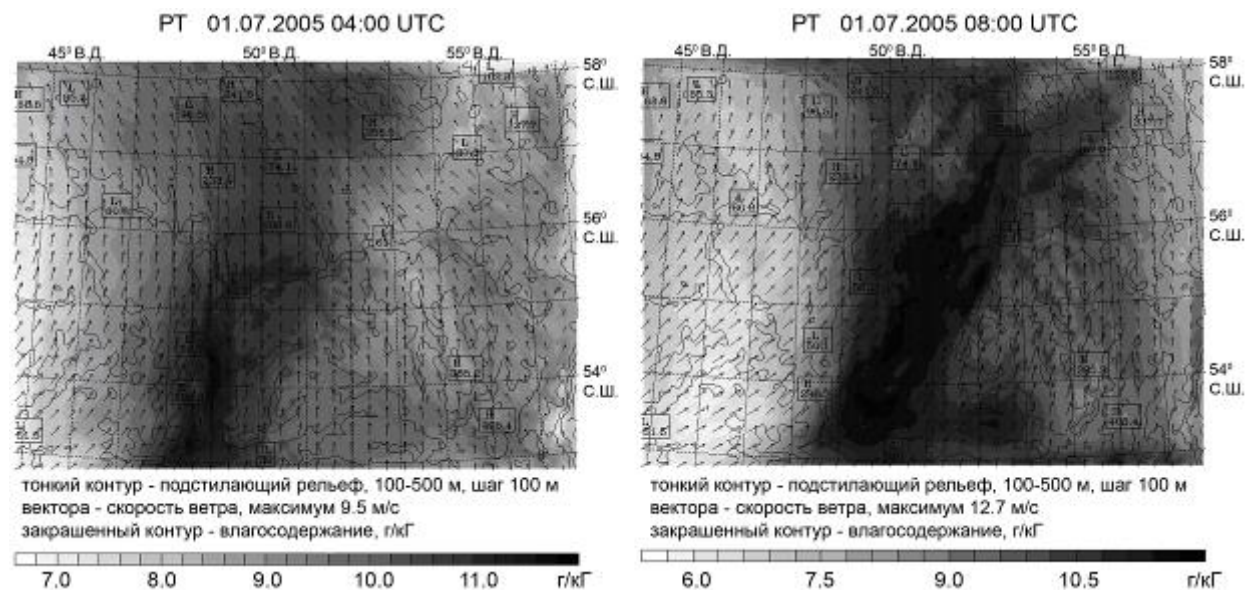


Рис. 4. Влагосодержание на высоте 30 м над поверхностью земли.

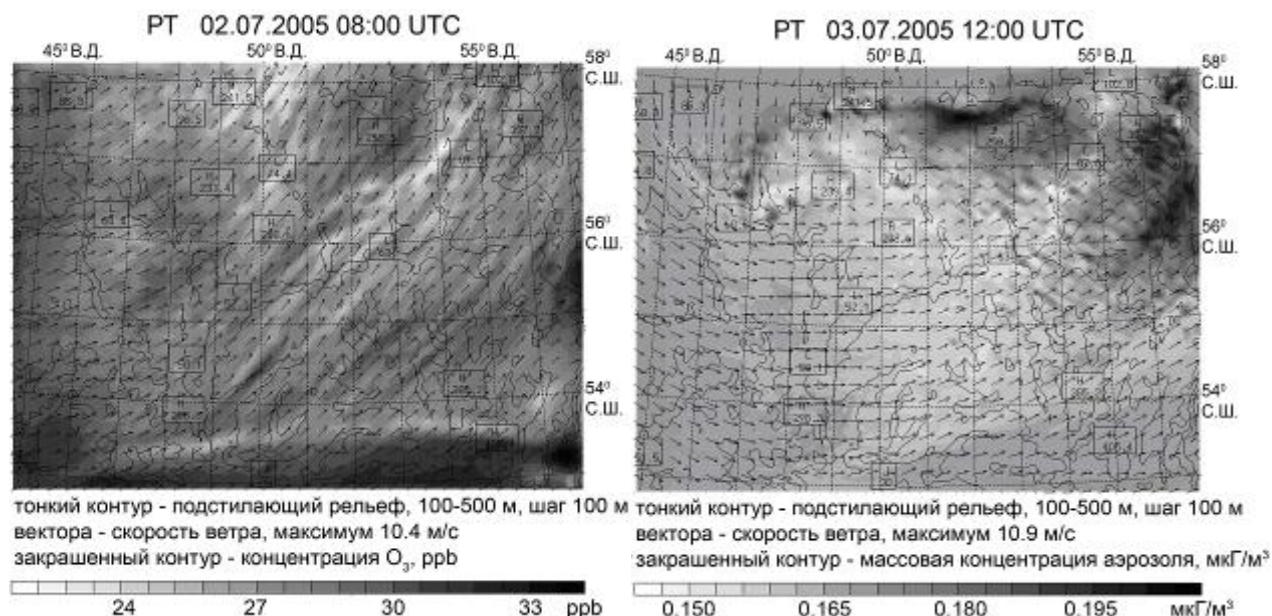


Рис. 5. Концентрация озона и аэрозоля на высоте 30 м над поверхностью земли.

Проведен анализ мезомасштабной пространственно-временной структуры полученных результатов. Результаты исследования показывают, что влияние квазиравнинного рельефа на мезомасштабную неоднородную структуру метеопараметров и примесей приземного слоя существенно, а на масштабах до 100 км является основным фактором формирования неоднородной структуры.

Структура приземного слоя (30 м над поверхностью) фоновых примесей обладает суточной зависимостью, формирует горизонтальные квазипериодические структуры с выраженной анизотропией, определяемой локальной скоростью. Квазипериодические структуры имеют размеры 20-80 км по нормали к ветру, до 200 км по ветру и зависят от метеоситуации.

Получены оценки абсолютной вариации концентрации примесей в приземном (30 м над поверхностью) слое. Под абсолютной вариацией атмосферных параметров понимается разница между максимальным и минимальным значением соответствующих атмосферных параметров в поле горизонтальной пространственной структуры в фиксированный момент времени. Озон: ночью и днем 12 ppb (интервал [16-24, 28-36] ppb).  $\text{SO}_2$ : ночью 0.05-0.06 ppb (интервал [0.03-0.05, 0.08-0.10] ppb), днем 0.06-0.07 ppb (интервал [0.01-0.02, 0.08-0.09] ppb).  $\text{CO}$ : ночью 0.4-0.6 ppb (интервал [79.9, 80.3-80.5] ppb), днем 0.3-0.4 ppb (интервал [79.5-79.6, 79.9] ppb).  $\text{H}_2\text{O}_2$ : 0.5 ppb (интервал [0.6, 1.1] ppb).

Показано формирование горизонтальных квазипериодических неоднородных структур в поле антропогенных выбросов на масштабах до 100 км. Характерный вертикальный масштаб распространения выброса - 100-200 м. Характерные периоды квазипериодической структуры – 15-25 км и 4-8 км.

На масштабах до 100 км поля концентрации фоновых примесей формируют квазипериодическую неоднородную структуру с характерным периодом 8-15 км, соответствующим характерным размерам неоднородной структуры карты рельефа подстилающей поверхности. Формируется два характерных режима приземного слоя фоновых примесей: с неоднородной структурой соответствующей карте рельефа подстилающей поверхности и с явно выраженной анизотропией, определяемой направлением ветра. Режим определяется скоростью ветра в области, критической скоростью смены режима является значение около 5 м/с.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с исследованиями мезомасштабной и локальной неоднородной структуры атмосферы других авторов.

**В четвертой главе** изложены основные полученные результаты по исследованию мезомасштабной неоднородной структуры коэффициента преломления радиоволн в атмосфере и ее влиянию на физические характеристики радиотрасс.

Создана нестационарная модель мезомасштабной неоднородной структуры коэффициента преломления радиоволн в атмосфере на основе полей температуры воздуха, парциального давления сухого воздуха и паров воды.

Достоверность результатов моделирования подтверждена сравнением с данными натурных измерений на сети приземных станций атмосферного мони-

торинга, что позволяет говорить о достаточной степени адекватности созданной модели. Отклонение результатов моделирования от эксперимента не более 4 % по значениям  $n-1$ .

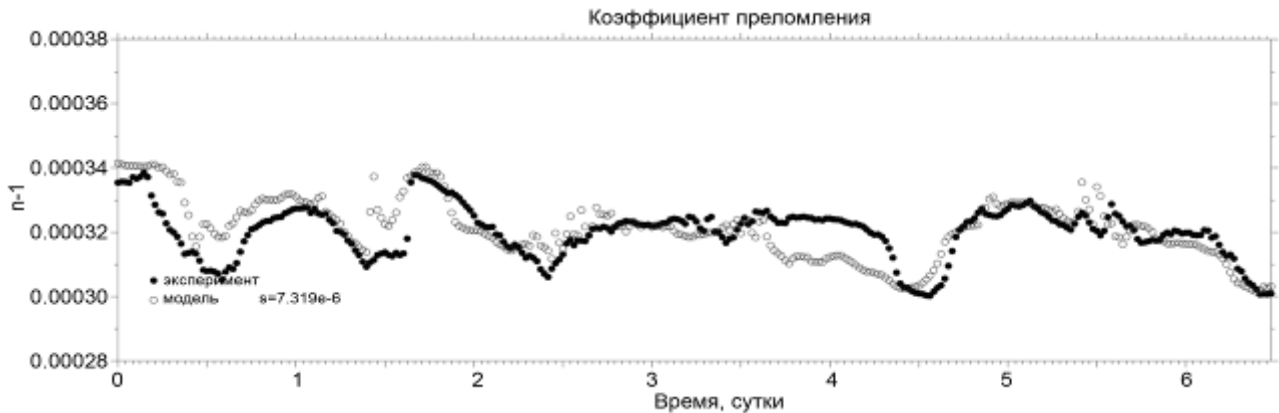


Рис. 6. Коэффициент преломления радиоволн в атмосфере на станции Азнакаево: модель и эксперимент. Отсчет времени от 1 июля 2005 г. 00:00 UTC.  $s$  - средне-квадратичное отклонение рядов.

Получена динамика мезомасштабной неоднородной структуры коэффициента преломления атмосферы над территорией РТ за длительные периоды времени, включая непрерывную динамику (с дискретизацией 30 мин) за полный 1998 г. Полученные данные показывают горизонтальную, высотную, временную изменчивость мезомасштабной неоднородной структуры поля коэффициента преломления.

Анализ мезомасштабной неоднородной структуры коэффициента преломления в атмосфере выявляет следующие закономерности. Зоной основных возмущений поля коэффициента преломления является приземная область высотой до 4 км, где наблюдаются неоднородности с характерными горизонтальными размерами во всем спектре разрешаемых моделью масштабов (от 10 км и больше). С высотой горизонтальная неоднородная структура сглаживается, упрощается, становится выраженной анизотропия поведения и к высоте 10 000 м поле коэффициента преломления стремится к повторению синоптического характера поля атмосферного давления.

На основе полученных данных о трехмерной неоднородной структуре коэффициента преломления радиоволн в атмосфере и ее годичной динамике проведено исследование физических характеристик различных радиотрасс. Чтобы исключить влияние поглощения радиоволн атмосферными газами рассматривается сантиметровый диапазон радиоволн. В указанном случае применимо приближение геометрической оптики и распространение радиоволн численно моделируется интегрированием лучевого уравнения Эйлера.

Получены возмущения оптической длины (ВОД) различных радиотрасс, которые вносит наличие в реальной атмосфере мезомасштабной неоднородной структуры атмосферных параметров в сравнении с идеализированной плоско-слоистой атмосферой с экспоненциальным вертикальным профилем индекса рефракции.

Получены ВОД для трасс с основанием на поверхности земли в центре исследуемой области, проходящих слой атмосферы высотой от 0 до 20 км, с



разными зенитными углами ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ) и направлениями (север, юг, восток, запад). ВОД выражены как зависимость оптической длины трассы от абсолютной длины трассы. Получена динамика ВОД для полного 1998 г. с шагом 6 ч. Получены среднесезонные значения ВОД -  $\langle \text{ВОД} \rangle$  и среднеквадратичное отклонение ВОД -  $S(\text{ВОД})$ .

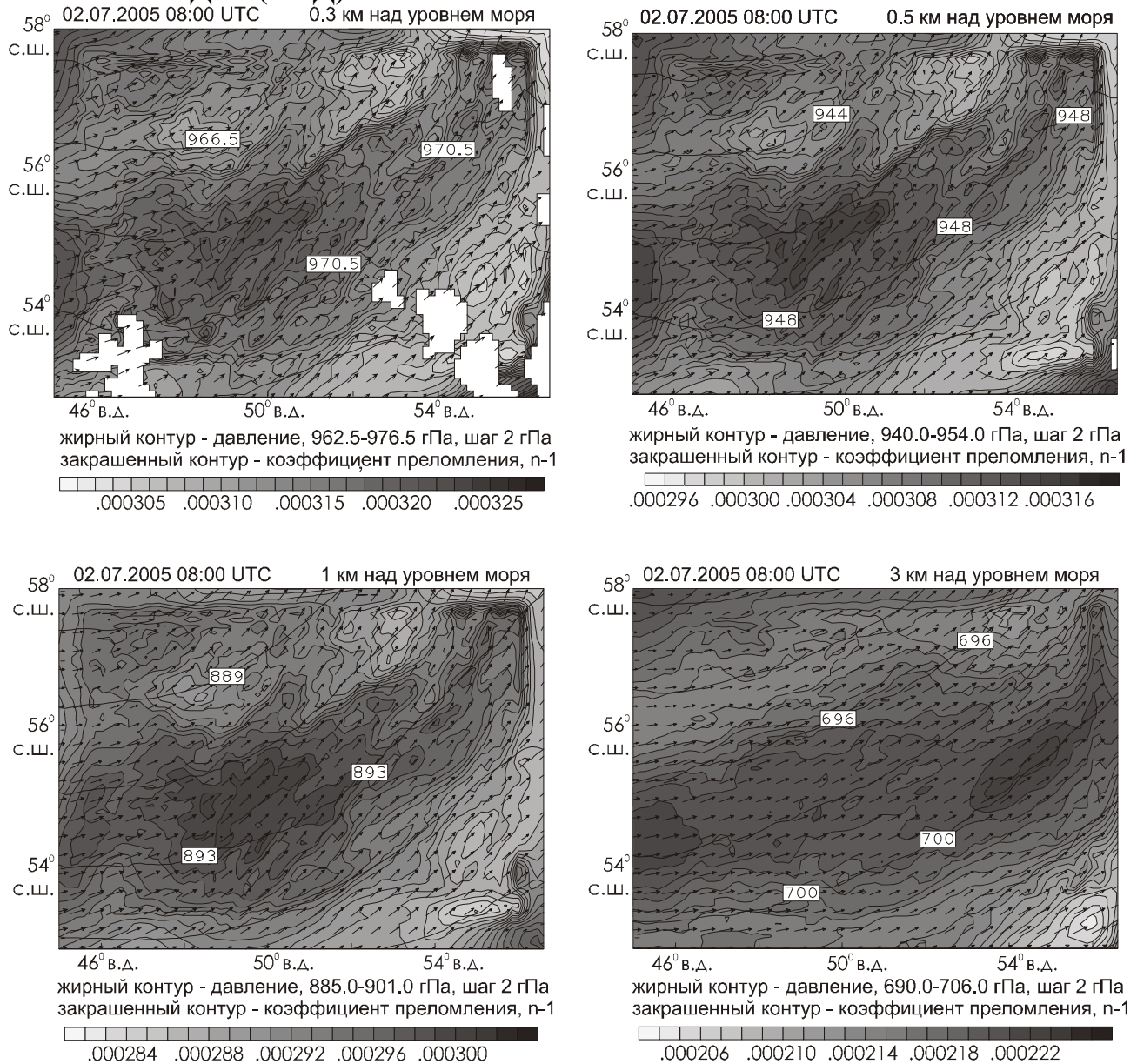


Рис. 7. Коэффициент преломления радиоволн. Горизонтальные срезы области моделирования на различных высотах над уровнем моря.

Анализ полученных данных показал следующие результаты.

Основной вклад в отклонение оптических характеристик радиотрасс от идеализированных вносит нижний слой атмосферы протяженностью от земной поверхности до высоты около 4 км.

ВОД принимает положительные и отрицательные значения, что обусловлено конкретной метеоситуацией. Зависимость ВОД от длины трассы обычно немонотонна, содержит несколько экстремумов.

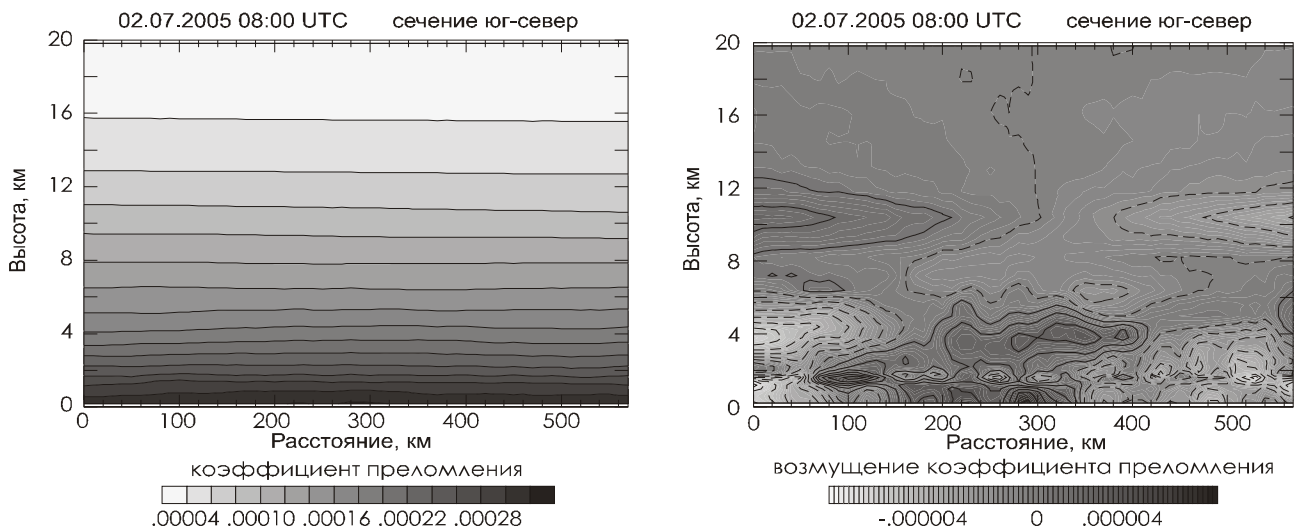


Рис. 8. Коэффициент преломления радиоволн. Вертикальный срез через центр области моделирования. Слева – абсолютные значения, справа – отклонение от среднего высотного профиля.

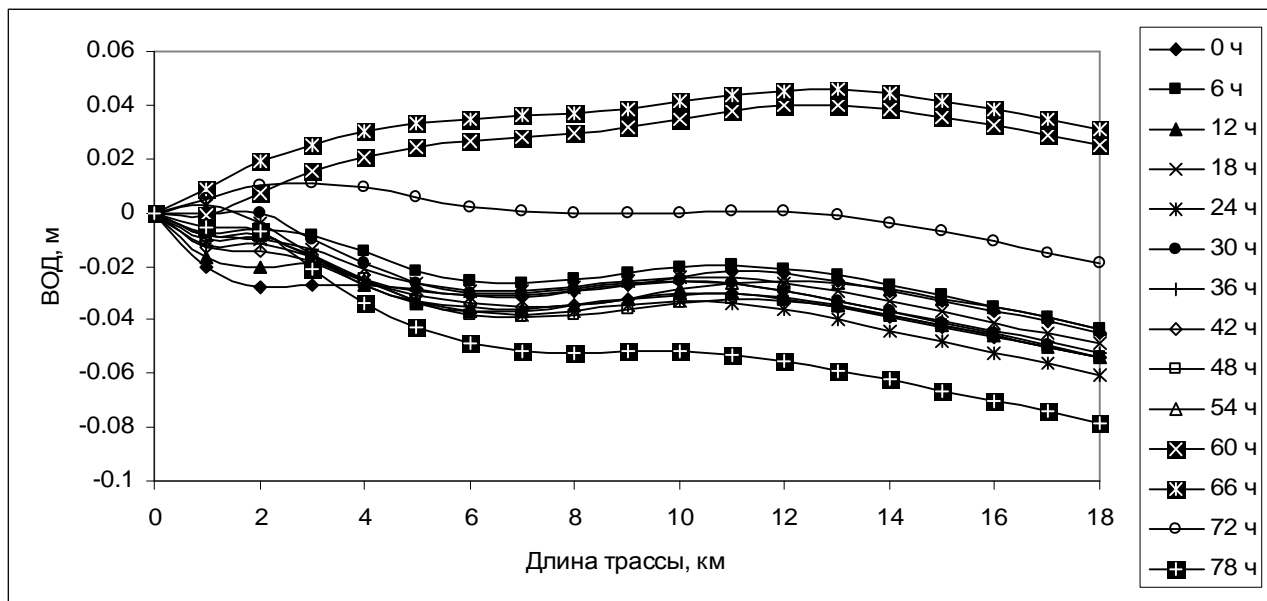


Рис. 9. ВОД для 14 последовательных моментов времени начиная от 1.07.1998 00:00 UTC с шагом 6 часов. Зенитный угол  $0^\circ$ .

$\langle \text{ВОД} \rangle$  и  $S(\text{ВОД})$  служат мерой возмущения оптических характеристик радиотрасс неоднородной структурой коэффициента преломления радиоволн в реальной атмосфере. При этом  $\langle \text{ВОД} \rangle$  служит мерой постоянной составляющей возмущения,  $S(\text{ВОД})$  служит мерой переменной составляющей возмущения (оценивает величину разброса значений ВОД вокруг  $\langle \text{ВОД} \rangle$ ).

Ниже приведены основные результаты для радиотрасс с нулевым зенитным углом, после чего указаны особенности и отличия в поведении результатов при остальных зенитных углах.

$\langle \text{ВОД} \rangle$  зимой, весной, осенью принимает отрицательные значения, имеет немонотонный ход, но преимущественно растет (по модулю) с высотой, достигая на высоте 17 км -90 мм зимой, -60 мм весной, -50 мм осенью. Летом  $\langle \text{ВОД} \rangle$  имеет сложную высотную зависимость, колеблясь в диапазоне +2 - -14 мм, обладает существенной суточной зависимостью.

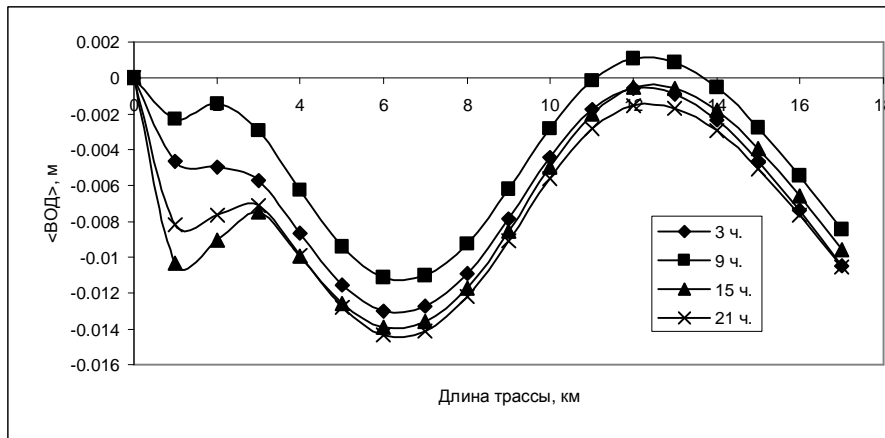


Рис. 10.  $\langle \text{ВОД} \rangle$  по массиву расчетов за лето 1998 года. Зенитный угол  $0^\circ$ .

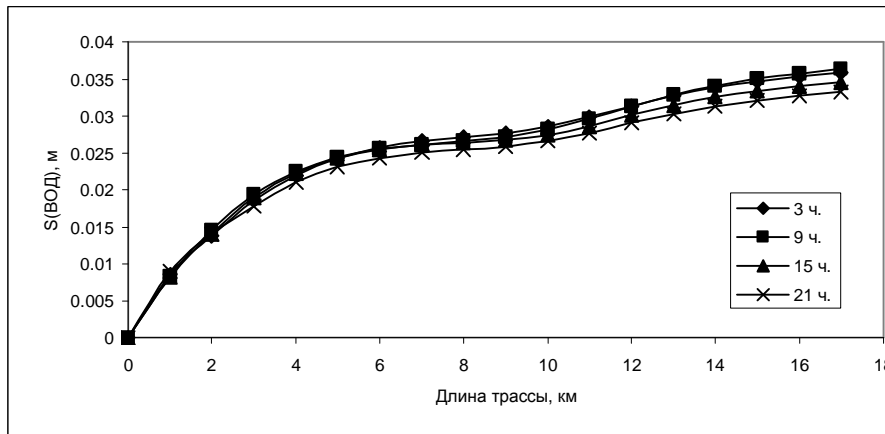


Рис. 11.  $S(\text{ВОД})$  по массиву расчетов за лето 1998 года. Зенитный угол  $0^\circ$ .

Таблица 1. Возмущение углов рефракции мезомасштабной неоднородной структурой реальной атмосферы. Среднее за лето возмущение и СКО угла рефракции. Приведены соответствующие отклонения радиотрасс земля-спутник протяженностью 20 000 км. Приведена суточная зависимость и зависимость от зенитного угла (на поверхности земли) радиотрассы.

Лето, эксп. модель	зенитный угол	$0^\circ$		$30^\circ$		$45^\circ$		$60^\circ$	
		угол рефр.	откл., м	угол рефр.	откл., м	угол рефр.	откл., м	угол рефр.	откл., м
3ч	ср.	1.71E-07	3.41	5.67E-06	113.35	9.70E-06	193.94	1.69E-05	337.17
	ср.кв.вар.	1.38E-07	2.76	4.71E-06	94.24	8.08E-06	161.55	1.40E-05	280.92
9ч	ср.	2.11E-07	4.23	3.49E-06	69.87	5.99E-06	119.82	1.04E-05	208.44
	ср.кв.вар.	2.24E-07	4.47	3.11E-06	62.23	5.30E-06	106.05	9.23E-06	184.70
15ч	ср.	2.49E-07	4.97	2.76E-06	55.23	4.68E-06	93.68	8.15E-06	163.03
	ср.кв.вар.	2.09E-07	4.19	2.81E-06	56.24	4.82E-06	96.44	8.39E-06	167.75
21ч	ср.	2.35E-07	4.70	5.64E-06	112.84	9.60E-06	191.98	1.67E-05	334.23
	ср.кв.вар.	1.66E-07	3.32	4.04E-06	80.85	6.96E-06	139.16	1.21E-05	241.35

Для всех сезонов и времени суток  $S(\text{ВОД})$  монотонно растет вдоль трассы (с высотой), принимая на высоте 17 км значения 27 мм зимой, 32 мм весной, 35 мм летом, 32 мм осенью.

Анализ значений и поведения  $\langle \text{ВОД} \rangle$  и  $S(\text{ВОД})$  для радиотрасс при зенитных углах  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  качественно повторяет приведенные выше результаты для зенитного угла  $0^\circ$  со следующими отличиями:  $\langle \text{ВОД} \rangle$  и  $S(\text{ВОД})$  растут

с ростом зенитного угла. При  $60^0$  на высоте 17 км  $S(\text{ВОД})$  достигает зимой 53 мм, летом 70 мм, весной 63 мм, осенью 64 мм,  $\langle \text{ВОД} \rangle$  достигает зимой -191 мм, весной -130 мм, осенью -106 мм, летом варьируется с высотой от 0 до -35 мм.

ВОД имеют значительную зависимость от направления наклона трассы (при ненулевых зенитных углах) для одинаковых моментов времени, но осредненные характеристики  $\langle \text{ВОД} \rangle$  и  $S(\text{ВОД})$  для различных времени суток и сезонов года не обнаруживают значимой зависимости от направления.

Получено возмущение углов рефракции мезомасштабной неоднородной структурой атмосферы и их годичная динамика. Получены статистические характеристики возмущения угла рефракции и соответствующего характерного отклонения радиотрассы.

Полученные результаты показывают существенную зависимость возмущения угла рефракции от времени суток и сезонов года, а также значимое влияние мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы на отклонение реальной радиотрассы от идеализированной.

**В заключении** подведены основные итоги работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- Разработана нестационарная модель мезомасштабной неоднородной структуры реальной атмосферы для метеопараметров (давления, температуры, скорости ветра, влагосодержания), малых газовых примесей и аэрозоля, коэффициента преломления радиоволн. Модель прошла верификацию по данным многолетних непрерывных натурных измерений на сети станций атмосферного мониторинга и показала хорошую достоверность результатов моделирования.
- Получены закономерности пространственно-временной изменчивости мезомасштабной неоднородной структуры атмосферы для метеопараметров, примесей (аэрозоль, газы  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) по длинным рядам трехмерных полей высокого разрешения над территорией РТ. Приземный слой атмосферы формирует два характерных режима горизонтальной неоднородной структуры в зависимости от локальной скорости ветра. Смена режима происходит при значении скорости ветра около 5 м/с. Характерные горизонтальные размеры неоднородностей 4-8, 15-25 км.
- Получена мезомасштабная неоднородная структура коэффициента преломления радиоволн в атмосфере и параметры соответствующего возмущения физических характеристик радиотрасс с учетом зависимости от времени суток и сезонов года. Среднее вызванное отклонение траектории при связи земля-спутник для трасс с зенитным углом  $60^0$  может достигать значений до 450 м, при среднеквадратичном отклонении от среднего до 330 м.



## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Исследование влияния квазиравнинного рельефа на локальную неоднородную структуру нижнего атмосферного слоя на основе моделирования и многолетнего эксперимента. / *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19. № 6. С. 542-546.
2. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Шлычков А.П. Моделирование динамики поля коэффициента преломления радиоволн сантиметрового диапазона в нижнем слое атмосферы. / *Доклады Академии Наук*. 2007. Т. 416. № 1. С. 112-114.
3. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Применение мезомасштабной модели WRF-CHEM для исследования вертикальной и горизонтальной структуры нижней атмосферы в Республике Татарстан. / *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 1. С. 69-74.
4. Zinin D.P., Teptin G.M., Khutorova O.G., Shlychkov A.P. Modeling the Dynamics of the Refraction Coefficient Field for Radiowaves of the Centimeter Range in the Lower Atmospheric Layer. / *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 416. № 7. P. 1062–1065.
5. Зинин Д.П. Моделирование атмосферного течения с учетом локальной орографии. / *Материалы региональной молодежной научно-практической конференции “Исследовательская деятельность молодежи и студентов, перспективы и развития города и района”*. Зеленодольск, 2005. С. 53-54.
6. Зинин Д.П. Моделирование атмосферных параметров в районе города Альметьевск с учетом орографии. / *Тезисы докладов итоговой научной студенческой конференции физического факультета КГУ*. Казань, 2004. С. 74.
7. Зинин Д.П., Тептин Г.М. Моделирование методом конечных объемов возмущения рельефом атмосферного потока. Исследование параметров модели. / *Тезисы докладов XII рабочей группы “Аэрозоли Сибири”*. Томск, 2005. С. 24.
8. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Вертикальная и горизонтальная структура нижней атмосферы в регионе восточной Европы на базе модели WRF. / *Тезисы конференции “Аэрозоли Сибири”*. Томск, 2006. С. 30.
9. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Горизонтальная и вертикальная структура индекса рефракции сантиметровых радиоволн в восточно-европейском регионе России на основе численного моделирования. / *Труды XXV Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”*. Санкт-Петербург, 2007. С. 557-564.
10. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Использование модели WRF для исследования динамики метеорологических параметров атмосферы и коэффициента преломления радиоволн в регионе Татарстана. / *Труды XXIV Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”*. Санкт-Петербург, 2006. С. 431-437.
11. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Моделирование коэффициента преломления для УКВ диапазона с учетом локальной орографии. / *Тезисы докладов 3-й международной конференции “Fundamental Problems of Physics”*. Казань, 2005. С. 80.
12. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. О моделировании атмосферных параметров и коэффициента преломления с учетом локальной орографии. / *Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции “Распространение радиоволн”*. Йошкар-Ола, 2005. Т. 1. С. 352-356.
13. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Численная модель физики атмосферы Татарстана и возможности ее использования в геоинформационных системах. / *Журнал экологии и промышленной безопасности*. 2008. № 3. С. 26-28.
14. Зинин Д.П., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. Численная модель физики атмосферы Татарстана и возможности ее использования в системах атмосферного мониторинга. / *Материалы III научной конференции «Промышленная экология и безопасность»*. Казань 2008. С. 65-66.
15. Зинин Д.П., Хуторова О.Г. Моделирование мезомасштабной структуры атмосферных параметров с учетом локальной орографии. / *Тезисы докладов XI рабочей группы “Аэрозоли Сибири”*. Томск, 2004. С. 20.
16. Зинин Д.П., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Моделирование динамики возмущенной структуры вертикального профиля коэффициента преломления сантиметровых радиоволн в тропосфере для задач спутникового радиозондирования и навигации. / *Журнал экологии и промышленной безопасности*. 2007. № 5. С. 51-51.

17. Зинин Д.П., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Моделирование распространения загрязнений в восточно-европейской области России на основе модели WRF-Chem. / Тезисы Российско-Канадского семинара "Моделирование атмосферного переноса загрязнений при террористических актах, взрывах и пожарах промышленных предприятий". Москва, 2006. С. 100-101.
18. Зинин Д.П., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Моделирование сложных атмосферных явлений, включая распространение загрязнений, для региона Татарстана. / Тезисы региональной научно-практической конференции "Геоинформационные системы. Тенденции, проблемы, решения". Казань, 2006. С. 21-22.
19. Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Зинин Д.П. Влияние локальной орографии на мезомасштабные вариации концентрации аэрозоля. / Сборник тезисов международной конференции "Аэрозоли и Безопасность". Обнинск, 2005. С. 143-144.
20. Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Зинин Д.П. Модель атмосферы Республики Татарстан с учетом быстропротекающих молекулярных процессов. / Отчеты НИОКР за 2006 г., г. Казань, АН РТ. С. 19-23.
21. Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Зинин Д.П. Прогнозирование мезомасштабной структуры загрязнения. / Отчеты НИОКР за 2005 г., г. Казань, АН РТ. С. 21-25.
22. Хуторова О.Г., Зинин Д.П., Тептин Г.М. Моделирование мезомасштабной структуры индекса рефракции радиоволн и сравнение с результатами наземных наблюдений. / Труды по докладам конференции "Распространение радиоволн - XXII". Ростов-на-Дону, 2008. С. 207-210.
23. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Шлычков А.П., Зинин Д.П., Журавлев А.А., Корчагин Г.Е., Александровская О.С., Васильев А.А. Исследования неоднородной структуры примесей в приземном слое на основе данных экологического мониторинга в Республике Татарстан. / Тезисы докладов на Всероссийской конференции "Развитие системы мониторинга состава атмосферы (PCMCA)". Москва, 2007. С. 20.
24. Khoutorova O.G., Zinin D.P. The effect of local orography in modeling of atmospheric parameters. / ERAE. 2004. V. 10. № 2. P. 3-18.
25. Khoutorova O.G., Zinin D.P., Teptin G.M. Numerical modeling of wave effects of mesoscale inhomogeneities of troposphere. / Abstracts of European Aerosol Conference 2008. P. 340.
26. Teptin G.M., Khoutorova O.G., Zinin D.P. Effect of local orography on mesoscale structure for aerosol concentration. / Abstracts of European Aerosol Conference 2005. Ghent, 2005. P. 328.
27. Zinin D.P. Numerical regional modeling of summer time-spatial structure of background atmospheric admixtures concentration. / ERAE. 2006. V. 12. № 4. P. 3-27.
28. Zinin D.P., Khoutorova O.G., Slychkov A.P. Investigation of time variation of spatial structure of atmospheric pollutants concentration in industrial region of Tatarstan by numerical modeling. / ERAE. 2006. V. 12. № 3. P. 10-26.
29. Zinin D.P., Teptin G.M., Khoutorova O.G. Application of mesoscale WRF-CHEM model for researching of vertical and horizontal inhomogeneous structure of pollutant concentration in the East Europe region. / Abstracts of European Aerosol Conference 2007. Salzburg, 2007. P. 262.
30. Zinin D.P., Teptin G.M., Khoutorova O.G. Modeling of relief influence on bottom layer atmospheric flow in scale of 25 km. / ERAE. 2005. V. 11. № 2. P. 3-15.
31. Zinin D.P., Teptin G.M., Khoutorova O.G. The modeling of dynamics of centimeter radio waves refraction index in bottom layer of atmosphere in East European area of Russia with using WRF model. / Abstracts of 36th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR). Beijing, 2007. P. 41-42.
32. Zinin D.P., Teptin G.M., Khoutorova O.G. The modeling of dynamics of meteorological parameters and aerosol concentration in bottom layer of atmosphere in East European area of Russia with using WRF model. / Chemical engineering transaction. 2006. V. 10. P. 257-262.